第47卷 第10期
2024年10月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 10
Oct. 2024

1986—2023年东昆仑库木库里盆地湖泊变化及成因分析

张小龙[1]， 陈亚宁[2]， 朱成刚[2]， 付爱红[2]， 李玉朋[2]， 孙慧兰[1]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘　要：系统研究东昆仑-库木库里盆地湖泊面积变化及其成因分析，对认识东昆仑山区的气候变化与水循环特征，解决新疆南部水资源短缺问题具有重要现实意义。基于GEE遥感云计算平台，对东昆仑-库木库里盆地1986—2023年的遥感影像进行了水体提取，并结合气象、冰川、土地利用等数据分析了湖泊面积变化及其影响因素。结果表明：(1) 在1986—2023年期间，东昆仑-库木库里的湖泊数量增加、面积增大。盆地湖泊面积由1986年的1196.47 km^2增加到2023年的2190.43 km^2，增幅达26.16 $km^2 \cdot a^{-1}$。(2) 1986—2023年库木库里盆地中最大湖泊阿牙克库木湖的面积扩大最为明显，面积增加了50.17%；湖泊面积大于1 km^2的湖泊数量，由1986年6个增加到2023年的9个。(3) 东昆仑-库木库里盆地湖泊面积的扩大主要受气温和降水的影响，而降水是湖泊面积扩大的主要因子，贡献率占63.80%；气温则通过加速冰川消融补给湖泊，贡献率低于降水补给。

关 键 词：湖泊面积；气温；降水；库木库里盆地

文章编号：1000-6060(2024)10-1651-11(1651～1661)

内陆湖处于一个相对独立的内陆水分循环系统中，湖泊水域面积的变化是其所在流域水量平衡的综合结果，其水量平衡主要受到冰川、冻土中地下冰等固态水资源以及地表水和地下水的汇集与蒸发作用的制约，其大小和数量的变化可从某种程度上反映出该地区的气候变化[1]。湖泊是水体的一部分，湖泊面积大小直接决定了其能够储存的水量，进而影响流域内的水资源量，湖泊面积的变化也影响流域内水量的分配，导致河流流量、汛期变化等受到影响[2]。高原内陆湖泊面积变化对流域水量平衡具有显著影响。高原内陆湖泊整体封闭没有出水口，通常具有较大的面积和深度，对流域水量的调节作用更强，蓄水能力较强，能更好地平衡丰水期和枯水期的水量变化。叠加高原独特的气候条件等优势，高原湖泊是开展气候变化影响及反馈、水量平衡以及气候相互作用研究的理想场所[3]。

湖泊对气候变化有快速的响应，尤其是高原内陆湖泊这一特点更为突出。青藏高原的湖泊大部分属于内陆湖泊，受人类活动影响较小，湖泊只随着其周围的自然环境变化而变化，即湖泊的变化反映了区域的气候变化状况[4]。大量的研究也证明了湖泊对气候变化的敏感性，并表明湖泊的物理、化学和生物特性对气候变化都做出了快速的响应[5]。湖泊也是地区和区域流域变化的关键指标，针对库木库里盆地湖泊的监测可以有助于理解湖泊对气候变化的反应。因此，研究湖泊面积变化对探索水文过程、评估水资源和了解气候变化至关重要。

利用遥感影像对库木库里盆地中的湖泊进行动态监测和变化分析，周亚辉等[6]以Landsat卫星1972—2013年间5个时期的遥感影像数据为基础，结合库木库里盆地气象数据对盐湖面积变化进行响应分析，结果表明平均气温、降水量、相对湿度对库木库里盆地内盐湖的面积扩大均有促进作用，且平均气温的作用占主导性。李均力等[7]认为阿牙克

收稿日期：2024-03-18；　**修订日期：**2024-05-13

基金项目：第三次新疆科学考察——昆仑山北坡水资源开发潜力及利用途径科学考察项目(2021xjkk0100)；新疆维吾尔自治区面上项目(2022D01A348)资助

作者简介：张小龙(1995-)，男，硕士研究生，主要从事水资源调查研究. E-mail: 1542819750@scu.edu.ge

通讯作者：陈亚宁(1958-)，男，研究员，主要从事干旱区生态水文研究. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

库木湖面积在1995年以后,湖泊面积呈阶段性的扩张。从1998年后的月度变化曲线来看,湖泊面积月度变化曲线逐年上升。降水变化很好地印证了湖泊面积的阶段性变化,湖泊面积在冬季的逐年扩张与冬季气温急升具有很好的线性关系。张文春等[8]认为阿牙克库木湖在1976—1996年呈小幅度的萎缩或扩张,在1996年以后湖泊面积加速扩张。从1980—2015年的降雨和气温数据看,湖泊面积与年平均降水量以及年平均温度具有正相关关系。陈军等[9]认为区域气候的暖湿化是1995—2015年阿牙克库木湖水量增加的主要背景,流域降水量的增加对湖泊水位上升产生直接驱动,持续升高的气温导致的补给冰川消融对湖泊扩张具有重要的促进作用。以上研究对不同时期库木库里盆地中阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、鲸鱼湖三大湖泊面积变化进行了研究,但研究时段不同,难以反映盆地湖泊近期变化和盆地湖泊整体变化,缺少对盆地其他湖泊变化的研究,并且所采用的遥感数据时间跨度较短、间隔较大,难以细致地在一个长时间跨度内分析库木库里盆地湖泊面积年际的变化趋势。本文利用Landsat长时间序列的影像数据,提取1986—2023年的湖泊水体信息,系统研究了过去38 a(1986—2023年)1 km^{2}以上湖泊面积的时空变化特征,同时结合气象水文以及冰川分析数据,对湖泊变化及其原因进行了初步研究。

1 研究区概况

库木库里盆地位于阿尔金山与昆仑山之间(图1),是一个较为典型的构造成因盆地,是一个高山环绕的封闭性高海拔盆地[10]。盆地主体位于昆仑山脉和祁漫塔格山之间,盆地东部有我国最高的沙漠–库木库里沙漠,北边是祁漫塔格山,西部是库木布彦山,南边延伸至阿尔喀山。由于库木库里盆地位于青藏高原北缘,盆地长期以来受到高原的构造运动的影响,经过长时间、多维度且多次数的抬升运动,最终形成封闭性高位断陷盆地特征[10]。盆地整体呈狭长型,东西长约350 km,中部最宽处达90 km,盆地地势东低西高,中部狼牙山将水系分割为阿其克库勒湖流域和阿牙克库木湖流域。盆地最高点位于西南角上的木孜塔格峰,最低点位于阿牙克库木湖。

盆地内气候干燥寒冷,终年无夏,年均气温0~1 ℃。1月最冷,7—8月最热,最热月均温8 ℃,极端最低气温-37 ℃,日较差25 ℃,年较差50~60 ℃。年均降水量100~200 mm,多集中于夏季,空间分布上呈现由西向东递增,盆地四周随海拔愈高降水愈多,高山谷地降水量较多,气候较湿润。皮提勒克

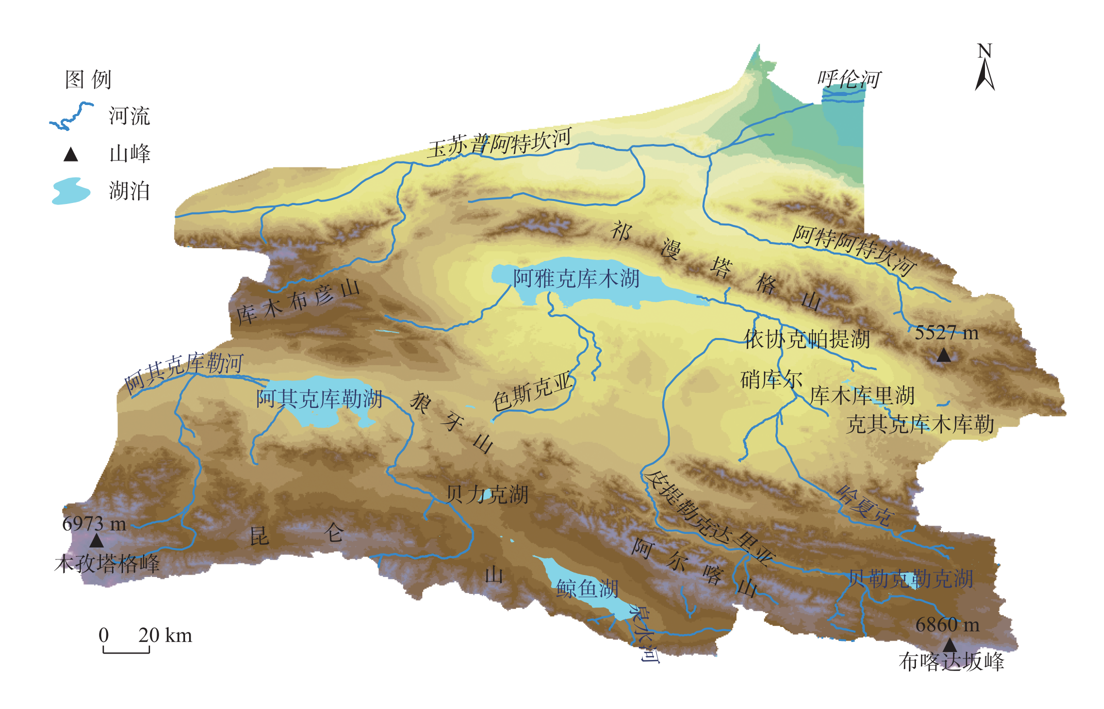


图1 研究区概况

Fig. 1 Schematic diagram of study area

河、色斯克亚河、阿其克库勒河分布在盆地中，四周高山降水汇聚，高原湖泊星罗棋布。盆地北部有新疆最大的湖泊阿牙克库木湖，西部有第二大湖泊阿其克库勒湖，南部有海拔最高的湖泊鲸鱼湖。该盆地湖泊卤水很丰富，湖表卤水充满全湖。盆地内经常刮西风或西北风，一般风速10~15 $m\cdot s^{-1}$，风沙大，区内植被稀少，岩石和土壤裸露地表，属于高寒荒漠植被区。

2　数据与方法

2.1　数据来源与预处理

采用GEE数据库中的JRC全球地表水数据集[11]作为数据源。为实现库木库里盆地长时间序列湖泊面积动态监测，本文研究选取1986—2023年7—10月覆盖湖泊且云量少于10%的研究区高质量遥感影像数据集，将已下载的遥感影像进行校正、去云和去阴影处理。根据下载的Landsat影像数据，选择不同的波段进行波段组合。通过GEE平台，去云掩膜提取算法去除掉无效影像和因山体阴影、云、冰川积雪造成的不可观测的影像数据，计算出了历年湖泊水体面积。由于研究区缺少气象观测站点，为探究库木库里盆地湖泊变化的原因，采用1986—2020年第三极地区长时间序列高分辨(1/30°)日尺度气温、降水数据集，分析湖泊面积变化与降水、气温变化的关系。气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)，冰川数据来源于两次冰川编码及项目三考解译。

2.2　研究方法

2.2.1　*改进的归一化差异水体指数的计算*　水体指数法是利用光谱的特征性质，选取与水体信息有关的光谱波段，通过构建合适的模型并进行运算得到水体指数值，选择最适合研究区的阈值，进行提取从而实现水体信息的获取[12]。归一化水体指数反映了水体在某一地区所处的状态或质量水平。采用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体[13]，计算效率高，且对水体具有较强的识别能力，尤其是在提取浑浊水体、高植被覆盖和区分冰雪和水体中效果明显优于NDWI。MNDWI指数显著改善了开阔水域特征，快速、准确地区分水体和非水体特征，在很大程度上降低或者消除建筑物的影响[14]。MNDWI指数的每个指数都是基本固定的，不会受人类活动和自然因素的变化而改变，具有可靠的科学依据，其计算公式如下:

$$MNDWI=(Green-SWIR)/(Green+SWIR) \quad (1)$$

式中：MNDWI为归一化差异水体指数；Green为绿光波段；SWIR为短波红外波段。

2.2.2　*基于GEE的水体面积变化算法*　基于GEE平台，提取库木库里盆地历年湖泊面积，具体过程包括以下主要步骤：(1) 导入库木库里盆地该研究区的矢量文件，设置提取水体数据的年份为1986—2023年。(2) 影像裁区与合成。根据1986—2023年选取GEE平台上Landsat系列数据经大气校正后的遥感影像，利用过滤器筛选出1986—2023年库木库里盆地湖泊原始影像数据。筛选JRC水体数据，对下载到影像中的山体阴影、云和冰川积雪进行掩膜处理。(3) 生成年度MNDWI。选择相对应的波段，对MNDWI进行逐像素计算，计算每个像素的MNDWI值。设定MNDWI阈值，数值约接近1说明越有可能是水体。(4) 计算水体频率和提取水体。大津算法(otsu)是一种阈值分割方法，前提计算出MNDWI等水体指数，再对水体指数灰度图像进行最优阈值分割。otsu算法是根据影像分割信息的最大类间方差来计算分割阈值，自动提取水体和非水体的分割阈值。当MNDWI值大于分割阈值时，将像素点划分为有效水体；当水体频率小于分割阈值时，将像素点划分为非水体。可使用一些评估指标进行量化，对提取的水体区域与实际水体区域进行比较，根据比较结果进行调整和优化算法。在进行水体提取时，需要注意不同季节、不同天气条件下水体的光谱特征可能发生的变化。(5) 提取盆地各个湖泊边界，计算出水体面积。通过代码计算出湖泊边界内所有水体像素，湖泊面积即为所有有效水体像元面积乘以水体频率的总和。(6) 导出比例EXCEL结果、导出水体影像、导出原始影像，提取出1986—2023年的湖泊面积。通过GEE平台对库木库里盆地1986—2023年的湖泊水体进行了提取计算，得出库木库里盆地自2000年以来大于1 km^2以上的湖泊总共有9个，分别是阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、鲸鱼湖、依协克帕提湖、库木库勒湖、克其克库木库勒湖、硝库尔湖、贝力克湖、贝勒克勒克湖。利用GEE进行MNDWI计算后，结合目视解译提取9期湖泊图像(图2)。

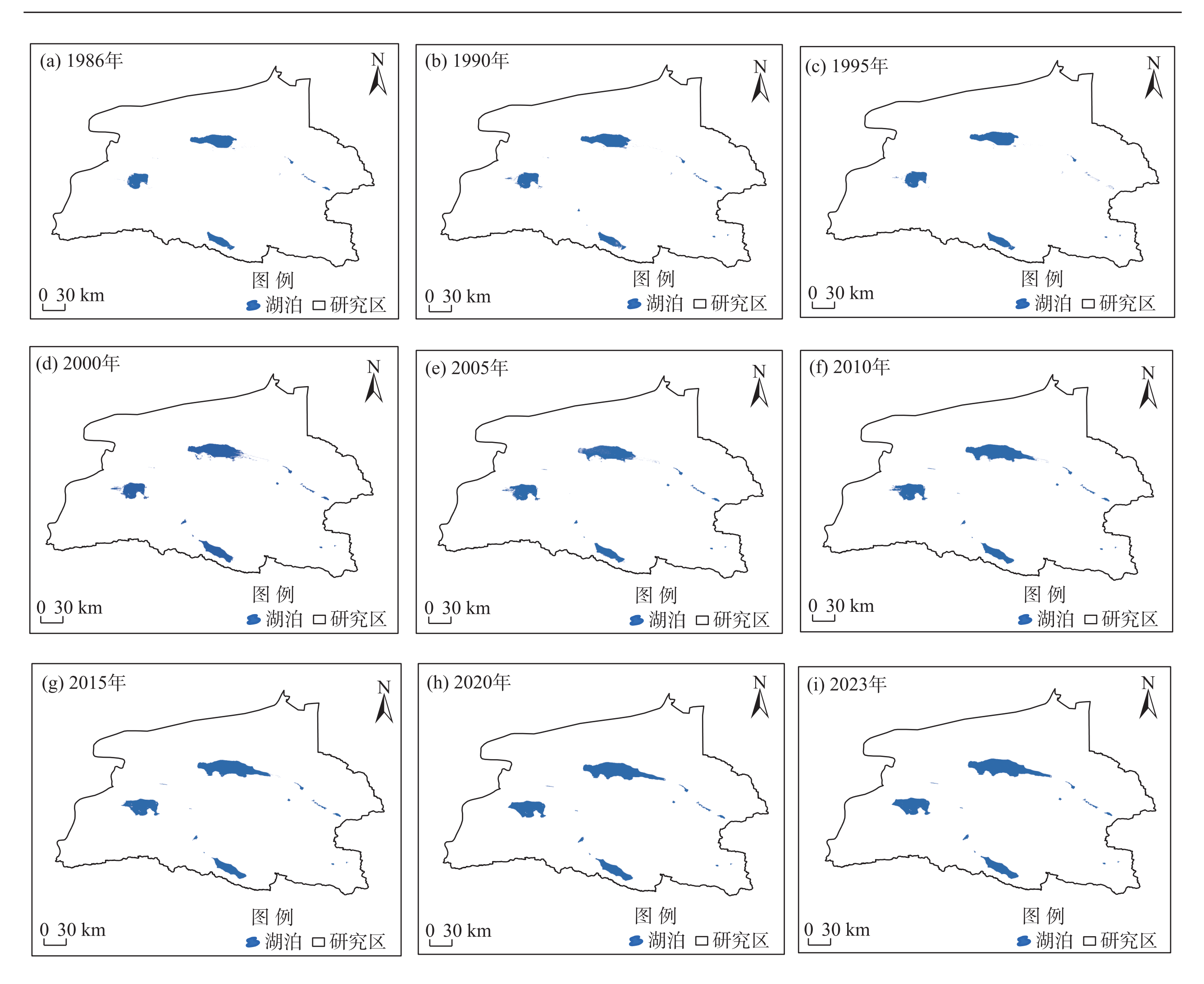


图2 1986—2023年库木库里盆地湖泊多时相面积

Fig. 2 Schematic diagram of lakes in Kumukuli Basin from 1986 to 2023

2.2.3 皮尔逊相关性分析 皮尔逊相关性分析方法是一种广泛应用于统计和数据科学中的方法，用于量化2个变量之间的线性关系强度。皮尔逊相关系数相对较为稳定，不易受到极端值的影响。当数据集中的个别点远离分布区域时，皮尔逊相关系数仍能提供一个相对稳健的估计。采用Pearson相关系数进行长期线性趋势检测湖泊与气象要素之间的相关性分析，计算公式如下[15]：

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-X)(Y_i-Y)}{\sqrt[2]{\sum_{i=1}^{n}X^2\sum_{i=1}^{n}X^2}} \quad (2)$$

式中：R为皮尔逊相关性分析方法；X_i为第i月水位数据；X为水位均值；Y_i为气候因子（气温、降水量）第i月的数据；Y为气候因子均值。

3 结果与分析

3.1 湖泊面积变化

38 a来，库木库里盆地湖泊数量呈增加趋势（表1）。1986—2000年1 km^2以上的湖泊6个，2000年以后增加至9个。库木库里盆地虽然存在新生湖，但面积增加主要是原构造湖的面积扩张。原构造湖主要是库木库里盆地的强烈隆起，使南北向挤缩、东西向伸张及断块的下陷形成，其中最大的构造湖是阿牙克库木湖，其次是阿其克库勒湖，鲸鱼湖是最高的构造湖。在库木库里盆地新构造和气候的影响下，使得库木库里盆地的构造湖整体上呈现出南北分带、东西分区的明显特征。

库木库里盆地湖泊面积在1986—2023年的38 a间，整体上呈现萎缩-扩张-萎缩-扩张的变化趋势

表1　9个时期湖泊面积统计

Tab. 1　Statistics of area of lakes for the 9 periods

/km^2

湖名	1986年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
阿牙克库木湖	553.19	632.91	571.85	663.00	764.80	940.36	993.57	1103.10	1110.12
阿其克库勒湖	332.15	352.68	350.99	358.13	456.33	493.81	551.08	594.32	595.80
鲸鱼湖	256.05	243.99	241.34	251.43	296.06	320.39	341.29	384.88	386.75
依协克帕提湖	14.09	15.04	13.80	19.87	20.24	19.87	19.14	20.11	19.70
库木库勒湖	21.57	21.87	10.23	22.18	25.32	24.25	23.45	25.72	25.56
克其克库木库勒湖	18.50	18.26	5.65	18.29	18.64	18.56	18.37	18.54	18.50
硝库尔湖	0.92	1.31	0.82	6.24	6.44	6.52	6.44	6.50	6.47
贝力克湖	1.36	5.73	5.48	16.09	10.41	12.99	14.29	22.00	22.36
贝勒克勒克湖	1.04	5.07	4.17	5.17	5.18	5.18	5.18	5.17	5.17
总计	1196.47	1296.86	1198.85	1360.40	1603.42	1841.93	1972.81	2180.34	2190.43

(图3)。1986—1988年湖泊面积有所萎缩,1988年湖泊面积减少到1081.86 km^2;1988—1990年湖泊面积略有扩大,到1990年湖泊面积扩大到1298.86 km^2;1990—1995年湖泊面积萎缩,1995年之后湖泊面积呈现波动扩张趋势。到2020年,湖泊面积扩到2180.34 km^2,2000年以后,湖泊面积增幅较大。总体来看,湖泊总面积2023年比1986年增加了993.96 km^2,增长率为26.16 $km^2 \cdot a^{-1}$,其中2000—2005年湖泊面积增幅最大,湖泊面积增加了243.02 km^2,增长率为48.60 $km^2 \cdot a^{-1}$。从湖泊面积统计来看,阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、鲸鱼湖三大湖泊面积显著扩张,尤其是阿牙克库木湖对库木库里盆地湖泊面积扩张贡献最大。

3.2　典型湖泊面积变化特征

由图3~4明显可以看出,在1986—2023年间,阿牙克库木湖、阿其克库勒湖和鲸鱼湖三大湖泊在不同时期内总体都处于扩大的过程,且趋势显著

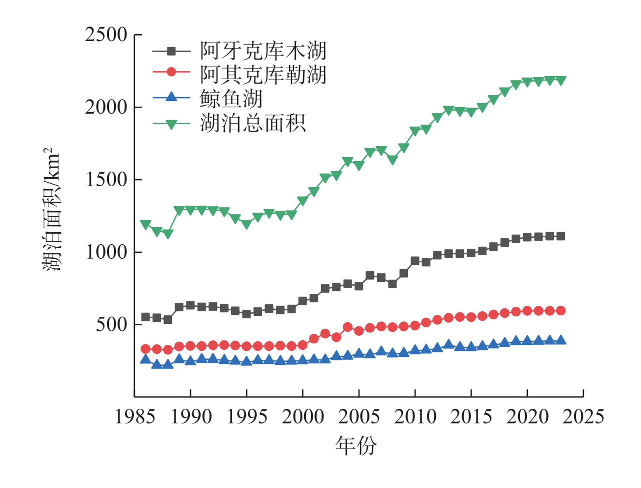


图3　湖泊面积年际变化

Fig. 3　Interannual variation of lake area

(P<0.05)。对比3个湖泊,湖泊面积扩大最显著的是阿牙克库木湖,从1986—2023年湖泊面积增加了556.93 km^2,增长率为14.66 $km^2 \cdot a^{-1}$,从空间变化来看(图2),阿牙克库木湖面积扩张显著,主要向依协克帕提河方向扩张,由于地形的限制,湖泊呈现中间宽两头窄的形状。阿其克库勒湖湖泊面积从1986年的332.15 km^2扩大至2023年的595.80 km^2,增长率为6.94 $km^2 \cdot a^{-1}$,从空间变化来看(图2),阿其克库勒湖面积主要向西南方向扩展。鲸鱼湖是库木库里盆地海拔最高的湖泊,湖泊面积变化小,湖泊面积从1986年的256.05 km^2扩大至2023年的386.75 km^2,增长率为3.44 $km^2 \cdot a^{-1}$,从空间变化来看(图2),鲸鱼湖主要向东南方向扩张。

3.3　湖泊面积变化成因分析

3.3.1　气候变化对湖泊演变的影响　气候变化是影响内陆湖泊形成与演变的重要因素之一。气候变化会导致降水量、蒸发量和冰雪储量变化,进而影响地表水体的形成和演变。从图5可知,1986—2023年库木库里盆地年平均气温整体呈现增长趋势,增长率为0.26 ℃·$(10a)^{-1}$,高于全国平均水平0.22 ℃·$(10a)^{-1}$[16],2000年之后年平均气温一直处于高位震荡阶段,平均为−4.6 ℃,与2000年之前相比,升高了约1 ℃。过去46 a来,库木库里盆地年降水量也呈波动的增加趋势(图5)。通过对盆地湖泊面积和气象因子进行Pearson相关性分析发现,气温与湖泊面积之间呈显著的正相关性(R^2=0.478, sig<0.05),尤其是在1986—2006年,气温与湖泊面积之间的相关性为0.561,因此,在这20 a,气温是湖泊面积扩张的主要因素。2006—2020年气温与湖泊面积之间不呈显著的相关性(R^2=0.478, sig>0.05),气温对湖泊面积

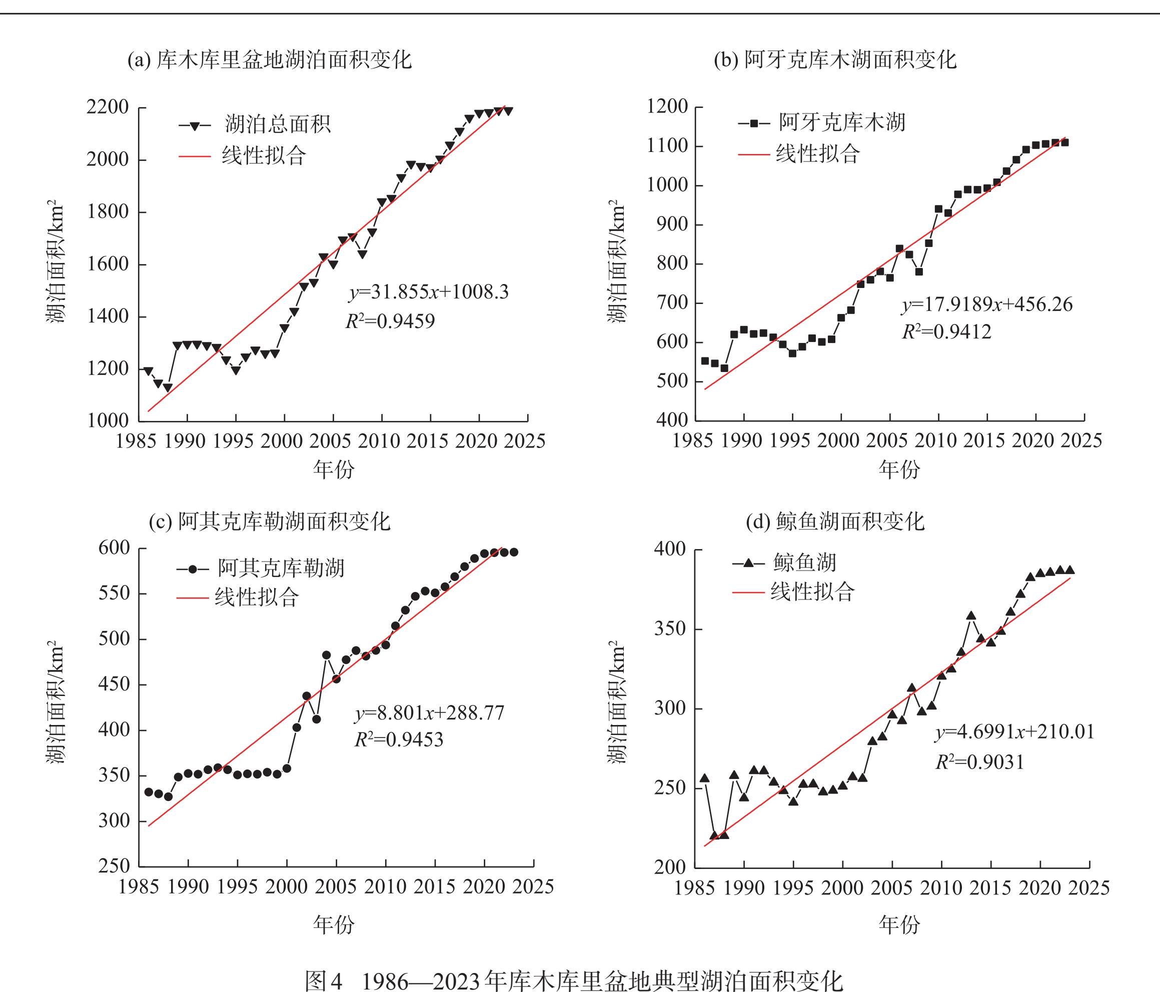


图4 1986—2023年库木库里盆地典型湖泊面积变化

Fig. 4 Changes of typical lake area in Kumukuli Basin from 1986 to 2023

图5 1986—2020年库木库里盆地年降水和气温与湖泊面积变化

Fig. 5 Annual precipitation and temperature and lake area changes in Kumukuli Basin from 1986 to 2020

变化的影响较弱。年降水量与湖泊面积之间也呈显著的正相关性(R^2=0.677，sig>0.01)。说明随着该区年平均气温和降水的增加，湖泊面积均呈增加趋势。通过利用地理探测器模式计算出库木库里盆地年降水量对湖泊面积的贡献率为63.80%，气温对湖泊面积的贡献率为41.22%。

3.3.2 冰川变化对湖泊演变的影响 冰川作为冰冻圈的重要组成部分，对气候变化的响应极为敏感[17]。受气候变化影响，冰川呈持续退缩状态，前人研究表明青藏高原及周边区域冰川冰储量在21世纪末减少为当前水平的64%[18]。在青藏高原内流区，冰川是湖泊的主要补给源之一，冰川变化必

然导致湖泊面积的变化。随着气候变暖，冰川消融，可能引起湖泊面积扩大，尤其是库木库里盆地高海拔地区，冰川对气候变化异常敏感[19]。库木库里盆地海拔高，其昆仑山、阿尔喀山、祁漫塔格山、库木布彦山分布大量的冰川（图6）。

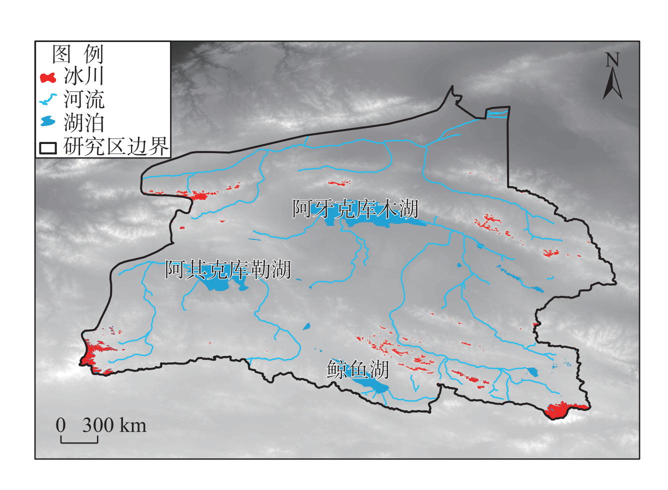


图6 库木库里盆地区域冰川分布

Fig. 6 Regional glacier distribution map in Kumukuli Basin

库木库里盆地阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、鲸鱼湖三大湖泊流域都有冰川分布，在1990—2020年冰川面积和冰川储量存在不同程度的减少。1990—2020年库木库里盆地冰川面积从654.86 km²减少到629.92 km²，退缩率为0.83 km²·a⁻¹（表2）。在这30 a，阿牙克库木湖流域冰川面积退缩了16.39 km²，退缩率为0.55 km²·a⁻¹；阿其克库勒湖流域冰川面积退缩了5.27 km²，退缩率为0.18 km²·a⁻¹；鲸鱼湖流域冰川面积退缩了3.28 km²，退缩率为0.11 km²·a⁻¹。

表2 冰川面积变化

Tab. 2 Glacial area changes /km²

流域	1990年	2000年	2010年	2020年	退缩率/km²·a⁻¹
阿牙克库木湖流域	340.65	328.55	328.77	324.26	0.55
阿其克库勒湖流域	251.66	249.71	248.54	246.39	0.18
鲸鱼湖流域	62.55	60.72	60.47	59.27	0.11
冰川总面积	654.86	638.98	637.78	629.92	0.83

通过分析库木库里盆地三大流域冰储量数据，1990—2020年冰储量从65.78 km³减少到了63.44 km³，减少了2.34 km³，其中，阿牙克库木湖流域退缩率最高（表3），冰川储量退缩了1.11 km³，退缩率为0.04 km³·a⁻¹。冰川储量和冰川面积变化趋势相近，都呈现下降趋势，但冰川面积的退缩率明显高于冰储量的退缩率。

表3 冰储量统计

Tab. 3 Statistics of ice reserves /km³

流域	1990年	2000年	2010年	2020年	退缩率/km³·a⁻¹
阿牙克库木湖流域	31.99	31.44	31.43	30.88	0.04
阿其克库勒湖流域	29.63	29.37	29.08	28.65	0.03
鲸鱼湖流域	4.16	4.05	4.01	3.91	0.01
冰川总储量	65.78	64.86	64.52	63.44	0.078

通过对库木库里盆地冰川面积和湖泊面积进行相关性分析，冰川面积与湖泊面积呈显著的负相关关系（R^2=0.83，sig<0.01）（图7）。冰川随着气温的升高，冰川面积和储量减少，导致湖泊水位上升，进而扩大湖泊面积，因此冰川也是影响库木库里盆地湖泊面积变化的间接因素。

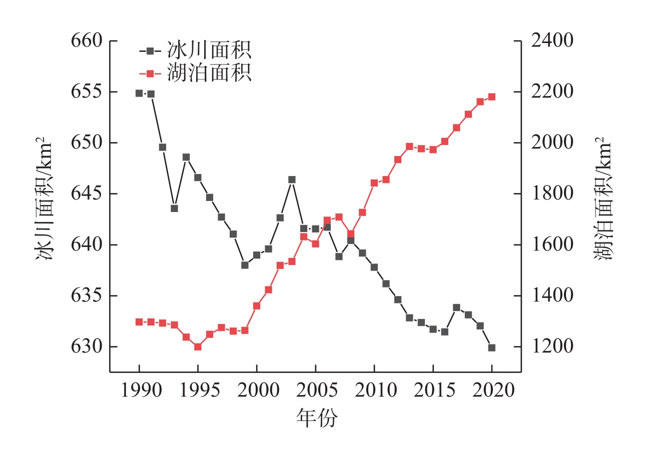


图7 1990—2020年冰川面积与湖泊面积变化

Fig. 7 Changes of glacier area and lake area from 1990 to 2020

3.3.3 土地利用类型对湖泊演变的影响 库木库里盆地湖泊地处无人区，受人类活动影响较小，不同的土地利用方式可以引起流域尺度上的水分下渗过程、产汇流过程、蒸散发过程和水量供需关系等的变化，从而对湖泊面积产生影响[20]。

为了进一步分析库木库里盆地湖泊变化的特点及其驱动机制，本文利用Landsat卫星影像数据，对库木库里盆地1986—2022年土地利用状况进行统计分析。通过选取1986—2022年其中8个年份的土地利用类型空间分布图（图8），得到该区域土地利用类型主要有裸地、草地、水域、冰雪四大类，其中裸地占到整个研究区的64.44%~73.62%，草地占22.71%~31.33%，水域占到2.31%~3.74%，冰雪占到1.31%~2.02%，其余土地类型占比较少。因此，在库木库里

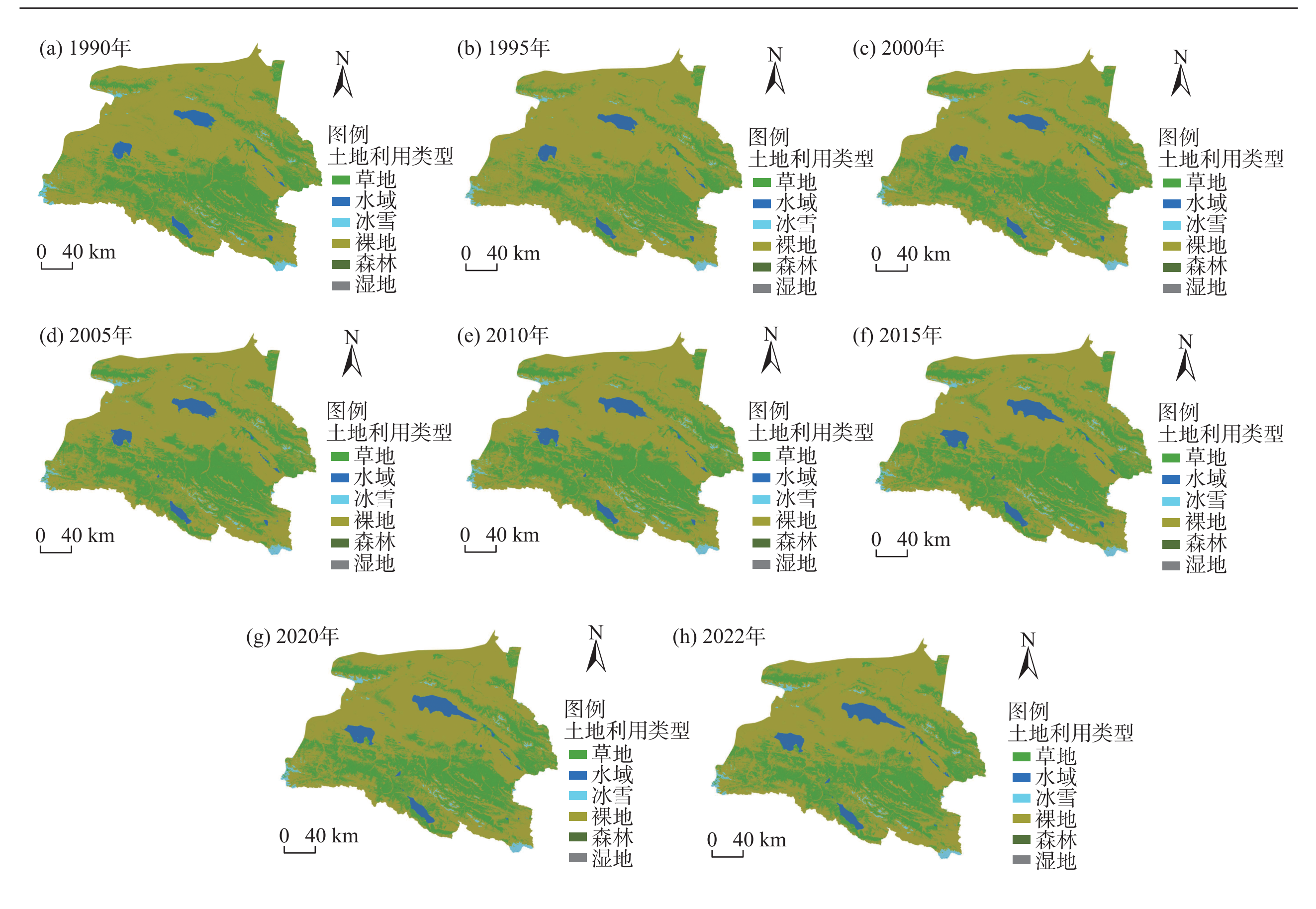


图8 库木库里盆地土地利用类型变化

Fig. 8 Land use change in Kumukuli Basin

盆地，土地利用类型主要以裸地和草地为主。

1986—2022年库木库里盆地土地利用类型中，水域面积有所上升，1990年水域面积占到了研究区的2.32%，2022年占到研究区的3.76%；草地面积则呈下降趋势，1990年草地面积占到研究区的28.01%，2022年占到研究区的26.44%（图9）。库木库里盆地出现草地退化，主要由于青藏高原气候干旱程度加剧[21]，植被减少，裸地扩大，水源涵养功能下降，更多的水流入湖泊，造成湖泊面积扩大。

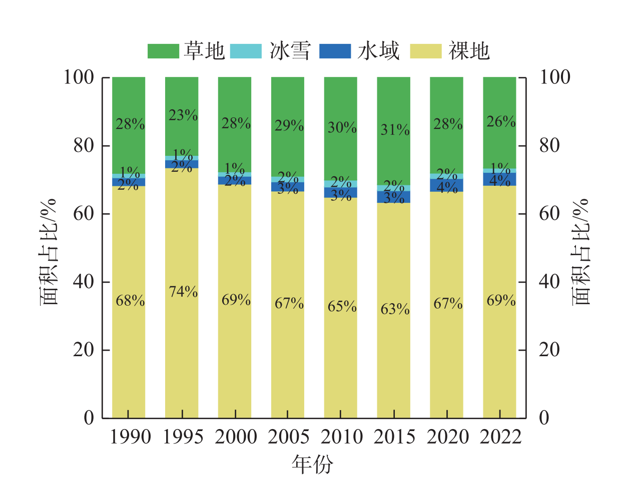


图9 湖泊集水面积土地利用类型占比

Fig. 9 Land use ratios of lake catchment area

4 讨 论

库木库里盆地位于青藏高原北缘，受到青藏高原隆升过程中形成的山间断陷盆地，气候受到青藏高原的影响，在全球气候变暖的背景下，该地区升温幅度极为显著[22]。青藏高原气候变暖超过全球同期增温速率的2倍[23]，降水也呈现多尺度变化特征，以增加趋势为主[24-25]，本文研究发现区域湖泊面积也在明显扩大，湖泊面积与气温存在着正相关关系，这与王伟等[26]、Zhou等[27]研究内容符合。气温升高，蒸发量增大，湖泊面积理应随之减少，气温对湖泊面积变化理应起负效应作用，然而，库木库里盆地湖泊面积却在增加，这主要与冰川消融和冻土补给增大有关。由于青藏高原气温的持续升高导致了高海拔地区以冰川补给为主导的湖泊水位迅速上升，特别是藏北高原的湖泊面积扩张受到冰川

融化增加的主导[28]。通过上述研究发现，库木库里盆地气温呈增加趋势，气温升高导致该流域冰雪融水增加，湖泊面积随之扩大，气温对库木库里盆地湖泊面积变化起正效应作用。库木库里盆地湖泊流域受持续增温的影响，湖泊补给的冰川呈现退缩的态势（图7）。因此，从长远来看，在全球气候变暖背景下，如果冰川持续退缩，库木库里盆地湖泊面积将可能缩小。

今后，需跟踪监测该流域气候、冰川、河流、湖泊等面积的变化，并预测未来流域水资源状况，在保持流域生态系统稳定与生态环境良性循环的前提下，通过水源外调或其他途径寻求对该流域多余水资源进行利用的可能性，为缓解新疆或柴达木盆地水资源短缺贡献一份力。

5 结 论

本文通过1986—2023年的遥感影像数据，基于GEE数据处理平台对库木库里盆地湖泊面积进行提取和分析，揭示了湖泊面积时空变化特征，并利用气温和降水的栅格数据探讨了湖泊面积变化的原因，得出以下主要结论：

（1）库木库里盆地湖泊面积总体呈显著增长趋势，湖泊面积经历了“萎缩-扩张-萎缩-扩张”的变化过程。湖泊面积2023年比1986年增加了993.96 km^2，增长率为26.16 $km^2 \cdot a^{-1}$；2000—2005年湖泊面积增幅最大，湖泊面积增加了243.02 km^2，增长率为48.60 $km^2 \cdot a^{-1}$。

（2）阿牙克库木湖、阿其克库勒湖和鲸鱼湖对盆地湖泊面积扩大贡献最大，三大湖泊面积均呈显著增长趋势（$P<0.05$）。其中湖泊面积增长最显著的是阿牙克库木湖，从1986—2023年湖泊面积增加了556.93 km^2，增长率为14.66 $km^2 \cdot a^{-1}$。

（3）库木库里盆地湖泊面积变化与气温和降水呈显著正相关（$P<0.01$）。降水是导致湖泊面积扩大的主要因子，气温则是湖泊面积扩大的重要因素。冰川与湖泊面积变化呈负相关关系，冰川是湖泊面积变化的间接影响因素。

参考文献（References）

[1] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810. [Yang Guishan, Ma Ronghua, Zhang Lu, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 799-810.]

[2] Ramillien G, Frappart F, Cazenave A, et al. Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 235(1-2): 283-301.

[3] Zhang G, Xie H, Duan S, et al. Water level variation of Lake Qinghai from satellite and in situ measurements under climate change[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2011, 5(1): 520-532.

[4] 梁丁丁. 1975—2010年青藏高原湖泊面积变化及对气候变化的响应[D]. 北京: 中国地质大学, 2016. [Liang Dingding. Variation of lakes areas and its responses to climate change in the Tibetan Plateau from 1975 to 2010[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.]

[5] Robertson D M, Ragotzkie R A. Changes in the thermal structure of moderate to large sized lakes in response to changes in air temperature[J]. Aquatic Sciences, 1990, 52(4): 360-380.

[6] 周亚辉, 王建萍, 陈亮, 等. 基于RS和GIS的库木库勒盆地盐湖面积变化及气候响应[J]. 盐湖研究, 2017, 25(2): 96-104. [Zhou Yahui, Wang Jianping, Chen Liang, et al. Response relationship between the saline lake and climate change of Kumukule Basin based on RS and GIS[J]. Salt Lake Research, 2017, 25(2): 96-104.]

[7] 李均力, 白洁, 王亚俊, 等. 1964—2015年阿牙克库木湖时序变化的气候响应[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 85-95. [Li Junli, Bai Jie, Wang Yajun, et al. Time series area of the Ayakkum Lake and its response to climate change[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 85-95.]

[8] 张文春, 张理想, 马金锋, 等. 近40余年阿牙克库木湖的时序变化研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2019, 36(6): 23-36. [Zhang Wenchun, Zhang Lixiang, Ma Jinfeng, et al. Study on the time series of Ayakkum Lake in the past 40 years[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2019, 36(6): 23-36.]

[9] 陈军, 汪永丰, 郑佳佳, 等. 中国阿牙克库木湖水量变化及其驱动机制[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1345-1356. [Chen Jun, Wang Yongfeng, Zheng Jiajia, et al. The changes in the water volume of Ayakekumu Lake based on satellite remote sensing data[J]. Journal of Natural Research, 2019, 34(6): 1345-1356.]

[10] 康南昌. 阿尔金断裂系与塔中构造带的形成与演化[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(1): 48-52. [Kang Nanchang. Altun fault system and formation and evolution of Tazhong structural belt[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(1): 48-52.]

[11] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540: 418-422.

[12] Jia T, Zhang X, Dong R, et al. Long-term spatial and temporal monitoring of cyanobacteria blooms using MODIS on google earth engine: A case study in Taihu Lake[J]. Remote Sensing, 2019, 11(19): 2269-2291.

[13] Xu H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open remotely sensed imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 27: 3025−3033.

[14] 王大钊, 王思梦, 黄昌. Sentinel-2和Landsat8影像的四种常用水体指数地表水体提取对比[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 157−165. [Wang Dazhao, Wang Simeng, Huang Chang. Comparison of Sentinel-2 and imagery with Landsat8 imagery for surface water extraction using four common water indexes[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(3): 157−165.]

[15] 金岩丽, 徐茂林, 高帅, 等. 2001—2018年三江源地表水动态变化及驱动力分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1147−1154. [Jin Yanli, Xu Maolin, Gao Shuai, et al. Analysis on the dynamic changes and driving forces of surface water in the Three-River Headwater region from 2001 to 2018[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1147−1154.]

[16] 段水强. 1976—2015年柴达木盆地湖泊演变及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 256−265. [Duan Shuiqiang. Lake evolution in the Qaidam Basin during 1976—2015 and their changes in response to climate and anthropogenic factors[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 256−265.]

[17] 杨雪雯, 王宁练, 梁倩, 等. 近60 a天山北坡冰川变化研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1074−1083. [Yang Xuewen, Wang Ninglian, Liang Qian, et al. Glacier changes on the north slope of Tianshan Mountains in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1074−1083.]

[18] 丁凯悦, 刘睿, 张翠兰, 等. 喜马拉雅地区叶如藏布流域冰川和冰湖变化遥感监测研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1871−1880. [Ding Kaiyue, Liu Rui, Zhang Cuilan, et al. Remote sensing monitoring of glacier and glacial lake changes in Yairu Zangbo Basin, Himalayas[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1871−1880.]

[19] 王松涛, 金晓媚, 高萌萌, 等. 阿牙克库木湖动态变化及其对冰川消融的影响[J]. 人民黄河, 2016, 38(7): 64−67. [Wang Songtao, Jin Xiaomei, Gao Mengmeng, et al. Dynamic change of Ayakumu Lake and its response to glaciers melting[J]. Yellow River, 2016, 38(7): 64−67.]

[20] 赵雪岩. 无定河流域土地利用变化方式及对径流的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. [Zhao Xueyan. Study on land use change and impact on runoff in Wuding River Basin[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.]

[21] 李育, 张占森, 周雪如. 全球变暖背景下青藏高原北缘气候干湿变化模式的转型与机制-古气候视角[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(6): 1960−1979. [Li Yu, Zhang Zhansen, Zhou Xueru. Transformation and mechanisms of climate wet/dry change on the northern Tibetan Plateau under global warming: A perspective from paleoclimatoligy[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2024, 54(6): 1960−1979.]

[22] 张辉, 韩风清, 张明刚. 青藏高原北缘库木库里盆地遥感研究[J]. 青海环境, 2001, 11(4): 139−155. [Zhang Hui, Han Fengqing, Zhang Minggang. Remote sensing research on Kumukuli Basin northern margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Qinghai Environment, 2001, 11(4): 139−155.]

[23] 靳铮, 游庆龙, 吴芳营, 等. 青藏高原三江源地区60 a气候与极端气候变化特征分析[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1042−1055. [Jin Zheng, You Qinglong, Wu Fangying, et al. Changes of climate and climate extremes in the Three-Rivers Headwaters region over the Tibetan Plateau during the past 60 years[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 1042−1055.]

[24] 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 青藏高原近60年来气候变化及其环境影响研究进展[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 1−10. [Yang Yaoxian, Hu Zeyong, Lu Fuquan, et al. Progress of recent 60 years' climate change and its environmental impacts on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(1): 1−10.]

[25] 冯川玉, 李陈彧, 周志浩, 等. 青藏高原降水变化特征及趋势分析[J]. 水文, 2022, 42(1): 75−79. [Feng Chuanyu, Li Chenyu, Zhou Zhihao, et al. Analysis on the characteristics and trend of precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(1): 75−79.]

[26] 王伟, 马龙, 葛拥晓, 等. 1986—2019年新疆湖泊变化时空特征及趋势分析[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 1300−1314. [Wang Wei, Ma Long, Ge Yongxiao, et al. Spatio-temporal variations and trend analysis of lake area in Xinjiang from 1986 to 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 1300−1314.]

[27] Zhou J, Wang L, Zhong X, et al. Quantifying the major drivers for the expanding lakes in the interior Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2022, 67(5): 474−478.]

[28] 边多, 杨志刚, 李林, 等. 近30年来西藏那曲地区湖泊变化对气候波动的响应[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 510−518. [Bian Duo, Yang Zhigang, Li Lin, et al. The response of lake area change to climate variations in north Tibetan Plateau during last 30 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 510−518.]

Lake change and genetic analysis in east Kunlun Kumukuli Basin from 1986 to 2023

ZHANG Xiaolong[1], CHEN Yaning[2], ZHU Chenggang[2],
FU Aihong[2], LI Yupeng[2], SUN Huilan[1]

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Conducting a systematic study on lake area changes and their underlying causes in the east Kunlun Kumukuli Basin holds significant practical importance. This research enhances our understanding of climate change patterns and the regional water cycle in the east Kunlun Mountains, addressing critical water shortage issues in southern Xinjiang, China. Utilizing the Google Earth Engine (GEE) remote sensing cloud computing platform, this study extracted water bodies from remote sensing images of the east Kunlun Kumukuli Basin between 1986 and 2023. It analyzed lake area changes and their influencing factors, incorporating meteorological data, glacier activity, and land use patterns. The findings reveal several key trends from 1986 to 2023. (1) The number and area of lakes in the east Kunlun and Kumukuli regions increased significantly, with the total lake area expanding from 1196.47 km^2 in 1986 to 2190.43 km^2 in 2023, representing an average annual increase of 26.16 km^2. (2) Ayakumu Lake, the largest in the region, experienced a 50.17% increase in area, while the number of lakes larger than 1 km^2 grew from six in 1986 to nine in 2023. (3) The primary driver behind this lake expansion is moderate precipitation, which accounts for 63.80% of the increase. Although air temperature plays a role in glacier melt, its contribution to lake area growth is less significant than that of precipitation.

Key words: lake area; temperature; precipitation; Kumukuli Basin